

CASO PRÁCTICO

Análisis espacial y temporal de la temperatura superficial en la microcuenca Apacheta mediante datos térmicos Landsat

Moncada, W. ^{1*}, Willems, B. ²

¹Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.

²Centro de Competencia del Agua, Lima, Perú.

Resumen: Los ecosistemas altoandinos, como los pastizales y las turberas, son frágiles y, debido a los efectos del cambio climático, su sostenibilidad está en peligro. Un factor clave que obstaculiza los esfuerzos de gestión sostenible del gobierno y las comunidades es la falta o escasez de datos eco-hidrológicos y climáticos *in situ*. En ese sentido, las técnicas de teledetección ofrecen una poderosa alternativa para la evaluación de la evolución de esos ecosistemas, al proporcionar una visión holística del territorio. El objetivo de este trabajo es determinar la evolución espacial y temporal de la temperatura atmosférica local de la microcuenca Apacheta en Ayacucho en los últimos 34 años, utilizando la temperatura superficial del suelo (TSS) como aproximación. Para ello, se utilizaron los datos térmicos de la serie Landsat (sensores TM, ETM+ y TIRS), que abarcan el período comprendido entre 1985 y 2018. Las estimaciones de TSS se realizaron a partir de la corrección de emisividad de las temperaturas de brillo a nivel del techo de la atmósfera, considerando el efecto atmosférico despreciable debido a las condiciones de alta transmisividad atmosférica de la zona de estudio. Los resultados muestran una tendencia positiva de la TSS con un aumento de 4,9 °C, equivalente al 27,5% de la TSS. Las tendencias son más altas (5,8 °C) en las zonas nevadas (equivalente al 35,3% de la TSS en toda la microcuenca). La TSS en la zona de nieve explica el 83,6% del comportamiento de la cubierta de nieve derivado del NDSI, con una superficie decreciente a medida que la TSS aumenta.

Palabras clave: temperatura de brillo, NDSI, fracción de cubierta vegetal, emisividad, temperatura superficial del suelo.

Spatial and temporal analysis of surface temperature in the Apacheta micro-basin using Landsat thermal data

Abstract: High Andean ecosystems, such as grasslands and peatlands, are fragile and, due to the effects of climate change, their sustainability is being jeopardized. A key factor hampering sustainable management efforts from the government and communities, is the lack or scarcity of in-situ eco-hydrological and climate data. In that sense, remote sensing techniques offers a powerful alternative for the assessment of the evolution of these ecosystems, by providing a holistic view of the territory. The objective of this work is to determine both the spatial and temporal evolution of the local atmospheric temperature of the Apacheta micro-basin in Ayacucho over the past 34 years, using the soil surface temperature (SST) as a proxy. For this, thermal data of Landsat series (TM, ETM+ and TIRS sensors), covering the period from 1985 to 2018, were used. The TSS estimates were made from the emissivity

To cite this article: Moncada, W., Willems, B. 2020. Spatial and temporal analysis of surface temperature in the Apacheta micro-basin using Landsat thermal data. *Revista de Teledetección*, 57, 51-63. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13855>

* Corresponding author: wilmer.moncada@unsch.edu.pe

correction of the brightness temperatures at the top of the atmosphere, considering the negligible atmospheric effect due to the conditions of high atmospheric transmissivity in the study area. The results show a positive trend of the SST with an increase of 4.9 °C, equivalent to 27.5% of the SST. Trends are higher (5.8 °C) in the snowy areas (equivalent to 35.3% of the TSS in the whole micro-basin). The SST in the snow area explains the 83.6% of the behavior of the snow cover derived by the NDSI, with a decreasing surface as SST increase.

Key words: brightness temperature, NDSI, vegetation cover fraction, emissivity, soil surface temperature.

1. Introducción

El cambio climático tiene como evidencias la desaparición de nevados y variaciones en la precipitación y la temperatura superficial del suelo (TSS) y del aire que impacta en los ecosistemas altoandinos, principalmente las zonas de recarga hídrica o bofedales en las cabeceras de cuenca, como es el caso de la microcuenca Apacheta que tiene la menor intensidad de precipitación en comparación a las otras zonas de la cuenca Cachi, influyendo de manera directa en el almacenamiento de agua en la presa Cuchoquesera para el consumo poblacional, agrícola y ganadero (Moncada et al., 2015).

El análisis de la TSS en los Andes es preocupante, debido a que se ha registrado un incremento de 0,11 °C por década entre los años 1939 a 1998, con 0,34 °C en los últimos 25 años, donde los dos últimos años asociados con El Niño fueron los más calientes (Vuille y Bradley, 2000); mientras que Aguilar et al. (2019) registraron 0,50 °C por década entre los 1000 a 1500 ms.n.m. y 1,7 °C por década por encima de los 5000 ms.n.m. En ese sentido, las zonas altas de los Andes por encima de los 4000 ms.n.m. son las más afectadas, pues el calentamiento se presentará con mayor intensidad (Solman et al., 2008).

Es evidente que estos hechos conllevan a la reducción de los nevados, disminución de cuerpos de agua, el estado de la vegetación, en general, la pérdida de los servicios ecosistémicos andinos, por lo que se hace necesario monitorear la temperatura superficial del suelo (TSS) utilizando las bandas térmicas de las imágenes Landsat de los sensores TM, ETM+ y TIRS (Quispe y Révolo, 2020).

Algunos métodos usan la inversión de la función de Planck en la banda térmica, para estimar los atributos del suelo, asociados a la reflectancia de la superficie (Sayão et al., 2018); otros, realizan mediciones in situ para validar la TSS, obteniendo

buenos resultados cuando se integra el NDVI con un R^2 de 0,76 y un RMSE de 1,96, y cuando se usa EVI con un R^2 de 0,78 y el RMSE de 1,85 (Xu et al., 2020).

En este contexto, la teledetección y la investigación de campo sirven como fuente de datos, para analizar patrones espacio-temporales de TSS, correlaciones intrínsecas con NDVI y el contenido de humedad en el suelo (MC) en diferentes estaciones. Así lo demostró Chi et al. (2020) en un estudio realizado a lo largo del río Amarillo (China) donde la TSS fue baja en 1987 y alta en el 2016, observando correlaciones significativas entre la TSS y el NDVI a escala regional y entre TSS, NDVI y MC a escala de sitio, permitiendo el uso de la TSS como una variable agrometeorológica fundamental que tiene influencia medible en el desarrollo de las plantas (Chi et al., 2020; Araghi et al., 2017).

A pesar de la importancia que tienen las cabeceras de cuenca, por ser zonas de recarga hídrica, pocos son los estudios realizados sobre la influencia de la TSS en la zona nival por encima de los 4800 m s.n.m. (TSSN), así como el posible impacto en el comportamiento de la cobertura de nieve o en el régimen térmico, este último supeditado a la presencia y variaciones de la nieve (Santos, 2016).

Un indicador de la cobertura de nieve es el índice de nieve de diferencia normalizada (NDSI) propuesto por Dozier (1989) para distinguir la superficie glaciar de otras formas similares, como suelos brillantes, agua y nubes. De esta manera se busca analizar la variación espacio-temporal de la TSS a partir de la banda térmica TM, ETM+ y TIRS en la microcuenca Apacheta, Región Ayacucho, desde 1985 al 2018, integrado el NDVI, la emisividad del suelo y la fracción de cubierta vegetal en el cálculo de la TSS de la microcuenca.

2. Material y métodos

2.1. Área de estudio y datos utilizados

La microcuenca Apacheta, se ubica en la cabecera de la cuenca Cachi en el distrito de Paras, provincia de Cangallo, Región Ayacucho, con longitudes de 74° 37' 26.4" W a 74° 45' 32.4" W y latitudes de 13° 17' 6" S a 13° 26' 9.6" S. La línea limítrofe mostrada en la Figura 1 separa el área sur en verde claro perteneciente a la región Ayacucho del área norte en verde oscuro perteneciente a la provincia de Huaytará de la región Huancavelica. Tiene un área determinada de 14.348,21 ha, con altitud mínima de 4112 m s.n.m., altitud máxima de 5045 m s.n.m., y altitud media de 4651 m s.n.m. (Pereda et al., 2018).

Tiene tres estadios estacionales, el lluvioso con valores altos de precipitación acumulada de 145,96 mm, temperatura mínima del aire 1,55 °C y humedad relativa 74,04%; el estadio seco, con valores altos de velocidad del viento 3,16 m/s y bajos de temperatura mínima del aire -2,40 °C; el estadio intermedio, con valores altos de temperatura

máxima del aire de 13,38 °C y radiación solar 552,37 Ly. La media anual de la precipitación acumulada es 71,09 mm, la temperatura máxima del aire 12,73 °C, la temperatura mínima del aire -0,35 °C, la humedad relativa 40,43%, la velocidad del viento 2,91 m/s y la radiación solar 514,43 Ly. (Moncada et al., 2020).

Se escogió una muestra representativa de 182 imágenes Landsat libres de nubes, es decir, un promedio de 5 a 6 imágenes por año, correspondientes a la escena Path 06 y Row 69, desde enero de 1985 hasta diciembre de 2018, descargadas del servidor Visor de visualización Global de la USGS (GloVis), <https://glovis.usgs.gov/app>. Se realizó la corrección radiométrica y atmosférica de las 182 imágenes Landsat de los sensores TM, ETM+ y OLI, mediante el método Flaash (ITT Visual Information Solutions, 2009; Rudjord y Due, 2012; H. Aguilar et al., 2014).

El cálculo del NDVI, se realizó tomando los valores de reflectancia de las bandas NIR y Rojo (Huete et al., 2002).

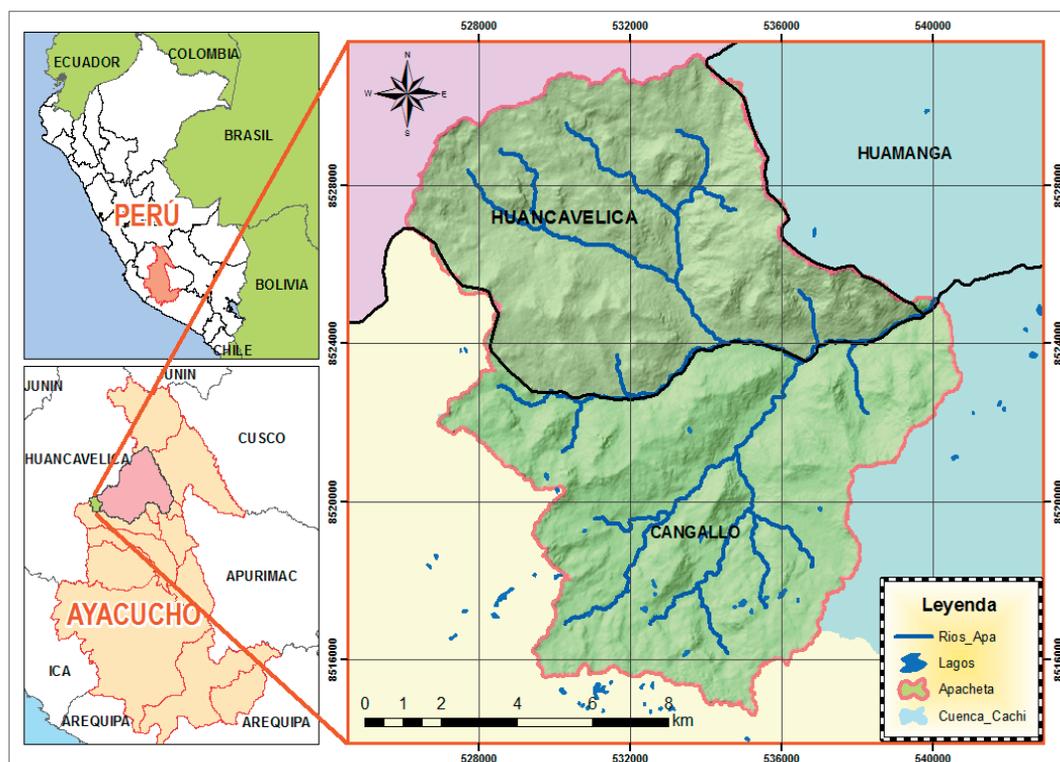


Figura 1. Ubicación geográfica de la microcuenca Apacheta, Región Ayacucho.

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo} \quad (1)$$

Asimismo, el cálculo del NDSI se realizó con los valores de reflectancia de las bandas Verde y el infrarrojo de onda corta (SWIR), de acuerdo con (Dozier, 1989):

$$NDSI = \frac{Verde - SWIR}{Verde + SWIR} \quad (2)$$

La banda verde es muy reflexiva a la nieve en comparación con la banda SWIR que es poco reflexiva para la nieve y altamente reflexiva para las nubes, permitiendo discriminar las nubes de la nieve. Para el cálculo de la TSS se utilizó el valor de la temperatura TOA de las bandas térmicas de los sensores TM, ETM+ y TIRS de resolución espacial 120, 60 y 100 m respectivamente, cuyas características se detallan en la Tabla 1 (Arvidson et al., 2013; USGS, 2019).

2.2. Procesamiento de las bandas térmicas de los sensores TM, ETM+ y TIRS

El manejo de la información de las bandas térmicas de los sensores TM, ETM+ y TIRS requiere de un procesamiento para la estimación de la TSS en °C, conforme se detalla en el esquema de la Figura 2, según los métodos desarrollados por Artis y Carnahan (1982); Weng et al. (2004); Avdan y Jovanovska (2016) y Jiménez-Muñoz et al., (2009; 2014).

La Fracción de Cubierta Vegetal (FCV) se define como la fracción horizontal de área asociada con la parte fotosintéticamente activa de vegetación, indica la proporción de suelo ocupada por vegetación que se adquiere de los umbrales de NDVI (Gutman y Ignatov, 1998; Zhang et al., 2009). Carlson y Ripley (1997) propusieron valores de $NDVI_{max} = 0,5$ para vegetación de mayor verdor y $NDVI_{min} = 0,2$ para vegetación mínima presente en suelo desnudo, de acuerdo con la Ecuación 3.

Tabla 1. Características y comparación del cambio de ruido equivalente en la temperatura de brillo (NEΔT) con los rangos radiométricos de la banda térmica de los sensores TM, ETM+ y TIRS.

Sensor Banda	Rango longitud de onda (μm)	Longitud onda media (μm)	Resolución Espacial (m)	NEΔT a 285 K	Rango escala radiométrica (W/m²srμm)	Rango temperatura útil (K)
B6-TM	10,40–12,50	11,45	120	0,17–0,3	1,238–15,3	200–340
B6-ETM+	10,31–12,36	11,34	60	0,26 0,21	0,0–17,04 3,2–12,65	130–350 240–320
B10-TIRS	10,60–11,19	10,895	100	< 0,1	---	240–300
B11-TIRS	11,50–12,51	12,01	100			240–360

Fuente: (USGS, 2019); (Arvidson et al., 2013).

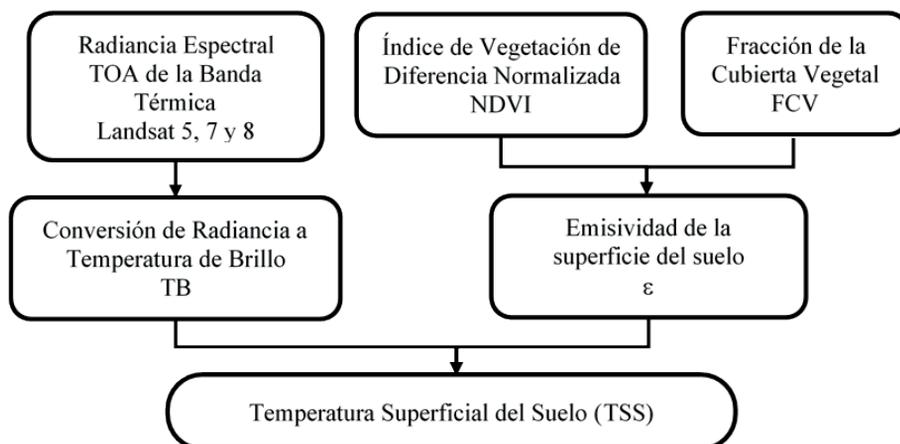


Figura 2. Esquema del cálculo de la Temperatura Superficial del Suelo (TSS).

$$FCV = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 = \left(\frac{NDVI - 0,2}{0,3} \right)^2 \quad (3)$$

Para Sobrino et al. (2004; 2008), la emisividad de la superficie del suelo (ϵ) se determina con la clasificación del NDVI según los rangos de las clases especificadas en la Tabla 2, donde algunos valores de ϵ fueron tomados de Caselles et al. (2011) y Mendoza (2014).

Las bandas térmicas se transformaron a radiancias utilizando los coeficientes radiométricos correspondientes, y la temperatura de brillo se obtuvo a partir de la Ecuación 4.

$$T_B = \frac{K_2}{Ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (4)$$

La TSS en °C se calcula a partir de la T_B y de la ϵ , conforme a lo establecido por Artis y Carnahan (1982) y Weng et al. (2004), según la Ecuación 5.

$$TSS = \frac{T_B}{\left[1 + \left(\frac{\lambda \sigma T_B}{hc}\right) Ln(\epsilon)\right]} - 273,15 \quad (5)$$

Donde: $h=6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ es la constante de Planck; $c=2,998 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ es la velocidad de la luz; $\sigma=1,38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ es la constante de Stefan-Boltzmann; λ es la longitud de onda de la radiancia emitida para cada banda térmica, $\lambda_{TM}=11,45 \text{ }\mu\text{m}$; $\lambda_{ETM}=11,34 \text{ }\mu\text{m}$ y $\lambda_{TIRS}=10,895 \text{ }\mu\text{m}$.

Si bien en el cálculo de la emisividad de la superficie se han utilizado índices obtenidos a partir de reflectividades corregidas del efecto atmosférico, hay que señalar que la Ecuación 5 no incluye una corrección atmosférica para la estimación de TSS. Consideramos que esta aproximación no afecta

sustancialmente a los resultados de nuestro estudio debido a las condiciones de alta transmisividad (y por tanto baja absorción) atmosférica en la zona de estudio.

3. Resultados y discusión

Los mapas anuales de la Figura 3 muestran la distribución espacial del comportamiento de la TSS en la microcuenca Apacheta desde el año 1985 hasta el 2018, en donde los píxeles azules corresponden a zonas muy frías, llegando a alcanzar un valor mínimo de -6°C y los anaranjados las más calientes, llegando a alcanzar un valor máximo de 38°C . En promedio, se observa que la TSS con valores bajos se da durante los años 1985, 1986, 1990 y 1991, 1994 a 1996, 2001 y 2007. Los valores altos se presentan de 1987 a 1989, en 1992, 1993, 1997, 1998, 1999, 2002, 2003, 2005, 2006, siendo del 2010 al 2018 los años con los valores más altos en comparación con los años anteriores.

Los valores de la media anual de la TSS para toda la microcuenca Apacheta (TSSM) extraídos de los mapas de la Figura 3 se registran en la Tabla 3, siendo el valor medio desde 1985 al 2018 de $17,8^\circ\text{C}$, con una desviación estándar de $3,4^\circ\text{C}$. También se han calculado las anomalías estandarizadas de la TSSM para cada año, generándose valores por encima del valor medio de la TSSM, denominadas anomalías positivas, que indican incremento y las anomalías negativas con valores por debajo del valor medio de la TSSM que indican disminución.

La Figura 4 muestra las anomalías estandarizadas de la media anual de la TSSM en toda la microcuenca, se observan anomalías positivas en amarillo con un significativo incremento de 1987

Tabla 2. Emisividad de la superficie del suelo para las distintas clases según el rango de valores del NDVI.

Clase	Rango de NDVI	Emisividad (ϵ)
Agua	[0;-0,1]	0,99
Arena	<-0,1;0]	0,974
Suelo árido	{0;0,1]	0,958
Suelo orgánico	{0,1;0,157]	0,976
Suelo desnudo	{0,157;0,2]	0,935
Suelo heterogéneo ($\epsilon_s=0,966$) y rugosidad compuesta de vegetación ($\epsilon_v=0,973$) $\epsilon=(\epsilon_v-\epsilon_s)\times FCV+\epsilon_s$	{0,2;0,6]	$\epsilon=0,966+0,007\times FCV$
Suelo con vegetación densa	{0,6;0,727]	0,985
Suelo con vegetación inundada	{0,727;1]	0,986

Fuente: (Sobrino et al., 2004); (Caselles et al., 2011); (Mendoza, 2014).

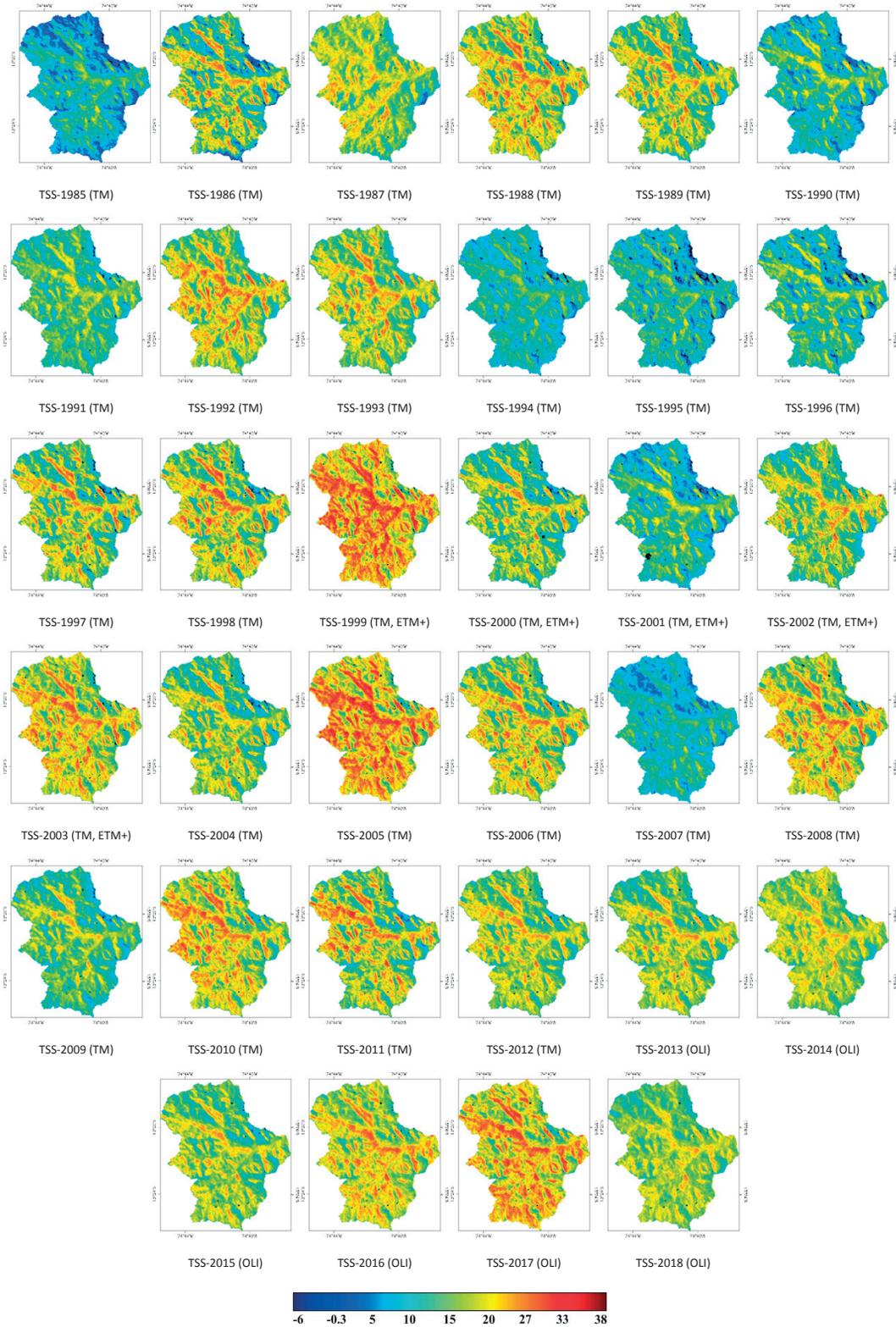


Figura 3. Mapas de la distribución espacial de la TSS media anual en la microcuenca Apacheta, a partir de la banda térmica TM, ETM+ y TIRS, desde 1985 hasta 2018.

Tabla 3. Determinación de las anomalías estandarizadas de la TSS media anual en la microcuenca Apacheta, a partir de la banda térmica de los sensores TM, ETM+ y TIRS, desde 1985 hasta 2018.

Año	x_i : TSS (°C)	$(x_i - \bar{X})$	$(x_i - \bar{X})^2$	$(x_i - \bar{X})/\sigma$	Año	x_i : TSS (°C)	$(x_i - \bar{X})$	$(x_i - \bar{X})^2$	$(x_i - \bar{X})/\sigma$
1985	8,7839	-9,0336	81,6063	-2,6382	2002	17,7325	-0,0850	0,0072	-0,0248
1986	16,8366	-0,9809	0,9621	-0,2864	2003	21,1426	3,3251	11,0564	0,9711
1987	18,6221	0,8046	0,6473	0,2350	2004	17,5664	-0,2511	0,0630	-0,0733
1988	20,4532	2,6357	6,9471	0,7697	2005	23,2719	5,4545	29,7513	1,5929
1989	18,3475	0,5300	0,2809	0,1548	2006	19,8522	2,0347	4,1401	0,5942
1990	12,4017	-5,4158	29,3305	-1,5816	2007	14,0208	-3,7967	14,4149	-1,1088
1991	15,1963	-2,6211	6,8704	-0,7655	2008	20,9819	3,1644	10,0136	0,9241
1992	20,1154	2,2979	5,2804	0,6711	2009	15,8079	-2,0096	4,0385	-0,5869
1993	19,0513	1,2338	1,5222	0,3603	2010	21,0752	3,2577	10,6127	0,9514
1994	12,0117	-5,8057	33,7066	-1,6955	2011	19,5684	1,7509	3,0657	0,5113
1995	11,9686	-5,8488	34,2089	-1,7081	2012	18,7128	0,8953	0,8016	0,2615
1996	13,4172	-4,4003	19,3623	-1,2851	2013	18,4914	0,6739	0,4541	0,1968
1997	18,4398	0,6224	0,3873	0,1818	2014	19,2070	1,3895	1,9306	0,4058
1998	19,8374	2,0199	4,0801	0,5899	2015	18,0528	0,2353	0,0554	0,0687
1999	22,7023	4,8849	23,8619	1,4266	2016	20,9838	3,1664	10,0259	0,9247
2000	16,9628	-0,8547	0,7305	-0,2496	2017	22,8465	5,0290	25,2911	1,4687
2001	13,0310	-4,7865	22,9104	-1,3978	2018	18,3013	0,4838	0,2341	0,1413

X: Promedio 17,8175 Desviación Estándar Muestral (σ)=3,42419

a 1989, en 1992,1993, 1997 a 1999, 2002, 2003, 2005, 2006, 2008, 2010 a 2018, destacando 2005 con un valor medio anual de 23,3 °C como uno de los años más calurosos durante el periodo de estudio. Las anomalías negativas en rojo se dan en los años 1985, 1986, 1990, 1991, 1994 a 1996, 2000, 2001, 2004, 2007 y 2009, resaltando 1985 con un valor medio anual de 8,8 °C como uno de los años más fríos durante todo el periodo de estudio. El grado de fiabilidad de los resultados es del 96,7% equivalente a un error del 3,3%.

En la serie de tiempo de la Figura 5 se muestra la tendencia de la media anual de la TSSM, cuya línea de tendencia sigue un significativo aumento, de acuerdo con el modelo de la Ecuación 6.

$$TSSM(^{\circ}C)=0,1486 \times \text{Año} - 279,59 \quad (6)$$

Este modelo estima que entre 1985 y 2018 la TSSM se ha incrementado en 4,9 °C, equivalente a un 27,5% de la media anual de la TSSM.

La TSS en la zona nival de la microcuenca Apacheta corresponde a zonas con altitudes por

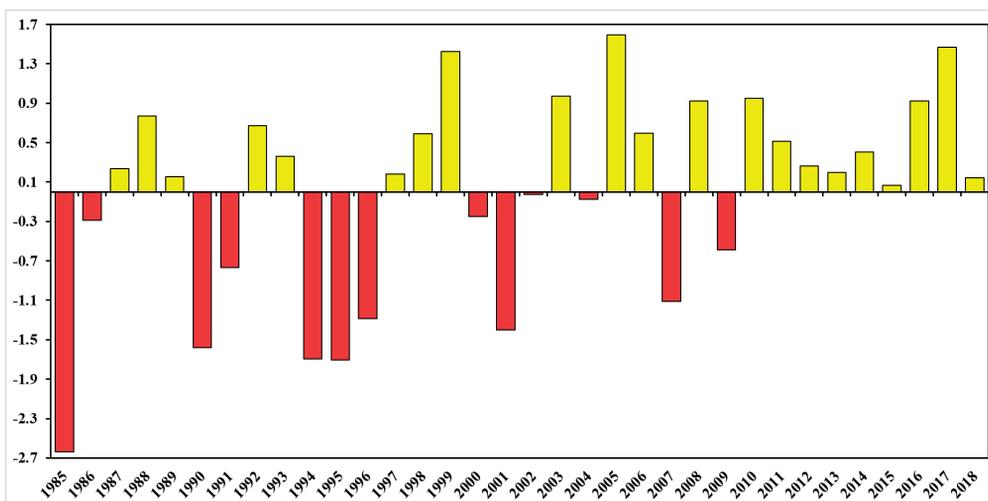


Figura 4. Anomalías estandarizadas de la TSSM media anual, desde 1985 hasta 2018.

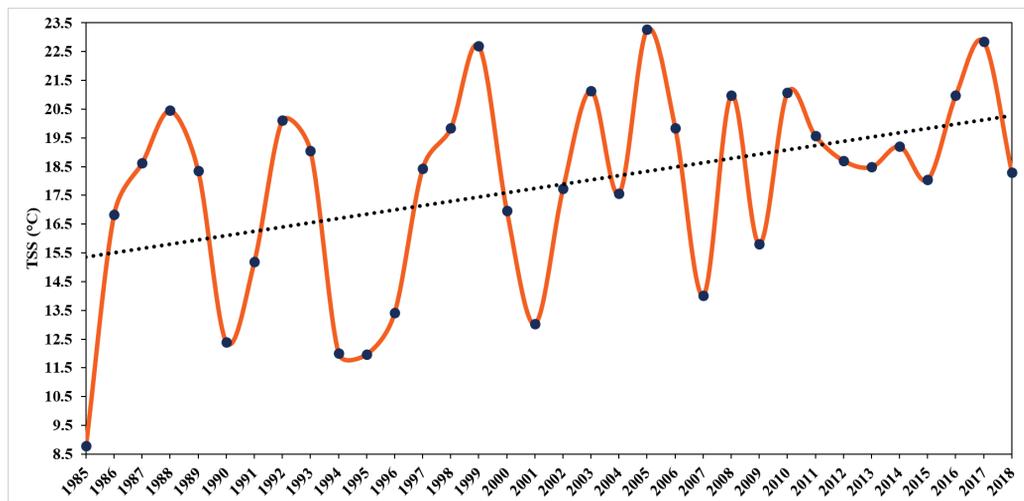


Figura 5. Tendencia de la media anual de la TSSM, desde 1985 hasta 2018.

encima de los 4800 m s.n.m. (TSSN), su cálculo se realiza a partir de los mapas de distribución espacial de la TSS de la Figura 3, desde 1985 a 2018, los cuales se registran en la Tabla 4, siendo el valor medio de la TSSN de 16,4 °C con una desviación estándar de 3,8 °C. También se ha determinado el valor de las anomalías estandarizadas de la TSSN para cada año, las mismas que describen un incremento o disminución por encima o por debajo del

valor medio de la TSSN, en los años con menor y mayor TSSN de la microcuenca, respectivamente.

La Figura 6 muestra las anomalías estandarizadas de la media anual de la TSSN en la microcuenca, donde se observan anomalías positivas en amarillo con un significativo incremento de 1987 a 1989, en 1992, 1993, 1997 a 1999, 2003 a 2006, 2008, 2010 a 2018, destacando 1999 con un valor medio

Tabla 4. Determinación de las anomalías estandarizadas de la TSS media anual en la zona nival, por encima de los 4800 m s.n.m., de la microcuenca Apacheta, a partir de la banda térmica de los sensores TM, ETM+ y TIRS, desde 1985 hasta 2018.

Año	x_i : Área(ha)	$(x_i - \bar{X})$	$(x_i - \bar{X})^2$	$(x_i - \bar{X})/\sigma$	Año	x_i : TSS (°C)	$(x_i - \bar{X})$	$(x_i - \bar{X})^2$	$(x_i - \bar{X})/\sigma$
1985	6,8921	-9,4792	89,8561	-2,4822	2002	15,4281	-0,9433	0,8897	-0,2470
1986	14,6205	-1,7509	3,0657	-0,4585	2003	20,0783	3,7069	13,7412	0,9707
1987	16,7071	0,3357	0,1127	0,0879	2004	16,9046	0,5332	0,2843	0,1396
1988	19,0745	2,7031	7,3066	0,7078	2005	22,8281	6,4567	41,6892	1,6907
1989	16,5150	0,1436	0,0206	0,0376	2006	18,9188	2,5475	6,4896	0,6671
1990	9,7352	-6,6362	44,0393	-1,7377	2007	10,5626	-5,8088	33,7423	-1,5210
1991	13,6013	-2,7701	7,6735	-0,7254	2008	19,7854	3,4140	11,6553	0,8940
1992	17,7891	1,4177	2,0099	0,3712	2009	13,7429	-2,6285	6,9091	-0,6883
1993	16,8261	0,4547	0,2068	0,1191	2010	19,9077	3,5363	12,5055	0,9260
1994	10,6844	-5,6869	32,3413	-1,4891	2011	17,8399	1,4685	2,1565	0,3845
1995	10,8783	-5,4931	30,1743	-1,4384	2012	17,3542	0,9828	0,9660	0,2574
1996	12,4697	-3,9017	15,2229	-1,0217	2013	17,1937	0,8223	0,6761	0,2153
1997	16,9255	0,5541	0,3070	0,1451	2014	17,4743	1,1029	1,2165	0,2888
1998	18,6515	2,2801	5,1991	0,5971	2015	17,8494	1,4780	2,1845	0,3870
1999	23,2161	6,8448	46,8507	1,7923	2016	19,5587	3,1873	10,1588	0,8346
2000	15,5387	-0,8327	0,6934	-0,2180	2017	22,3562	5,9848	35,8177	1,5671
2001	11,0723	-5,2991	28,0802	-1,3876	2018	17,6468	1,2754	1,6268	0,3340

X: Promedio 16,3714 Desviación Estándar Muestral (σ)=3,81895

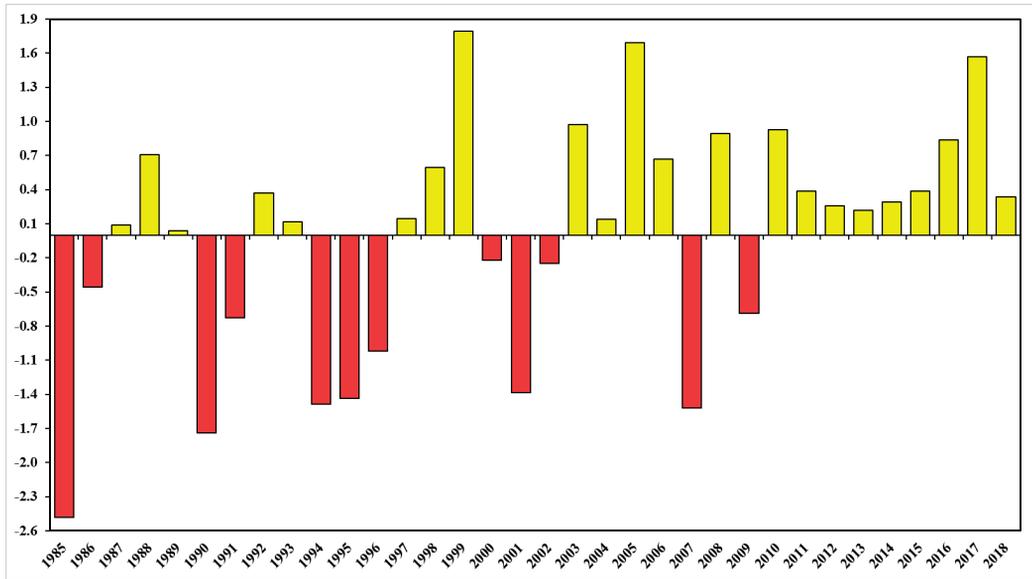


Figura 6. Anomalías estandarizadas de la TSSN, desde 1985 hasta 2018.

anual de 23,2°C como uno de los años más calurosos durante el periodo de estudio en dicha zona. Las anomalías negativas en rojo se dan en los años 1985, 1986, 1990, 1991, 1994 a 1996, 2000 a 2002, 2007 y 2009, resaltando al año 1985 con un valor medio anual de 6,9°C como el más frío de todos los años durante el periodo de estudio, tanto en la zona nival como en toda la microcuenca. El grado de fiabilidad de los resultados es del 95,9%, equivalente a un error del 4,1%.

En la serie de tiempo de la Figura 7 se muestra la tendencia de la media anual de la TSSN, con una línea de tendencia que sigue un significativo incremento según el modelo de la Ecuación 7.

$$TSSN(^{\circ}C)=0,1751 \times \text{Año} - 334,18 \quad (7)$$

Este modelo estima que entre 1985 y 2018 la TSSN se ha incrementado notablemente (en 5,8°C) equivalente a un 35,3% de la media anual de la TSSM. Es decir, la TSSN es mayor que la TSSM en 0,9°C, lo cual significa que la permanencia de

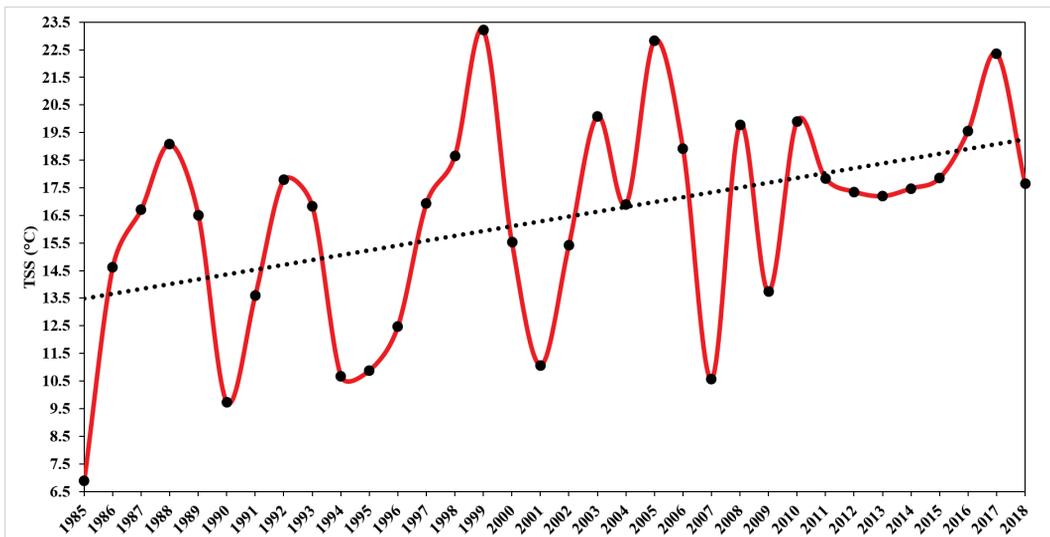


Figura 7. Tendencia de la media anual de la TSSN, desde 1985 hasta 2018.

nieve en la zona nival está siendo amenazada por la influencia directa de la TSS.

La TSSN sigue el mismo comportamiento que la TSSM, por lo que en la Figura 8 se muestra el comportamiento de la variación de la diferencia $\Delta T = TSSN - TSSM$, en donde se observa que la TSSM mantiene valores mayores con respecto a la TSSN a excepción del año 1999, donde la TSSN es mayor que la TSSM, asimismo se observa que en 2005 y 2015 la TSSM es muy próxima a la

TSSN, al contrario, en el 2007 la TSSN ha sido mucho menor que la TSSM, destacando que la variación de diferencias (ΔT) ha ido aumentando en el tiempo con una tendencia positiva que obedece al modelo de la Ecuación 8.

$$\Delta T = 0,0265 \times \text{Año} - 54,584 \quad (8)$$

Este modelo se valida aplicando las pruebas no paramétricas de análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Mann-Whitney-Wilcoxon, ello

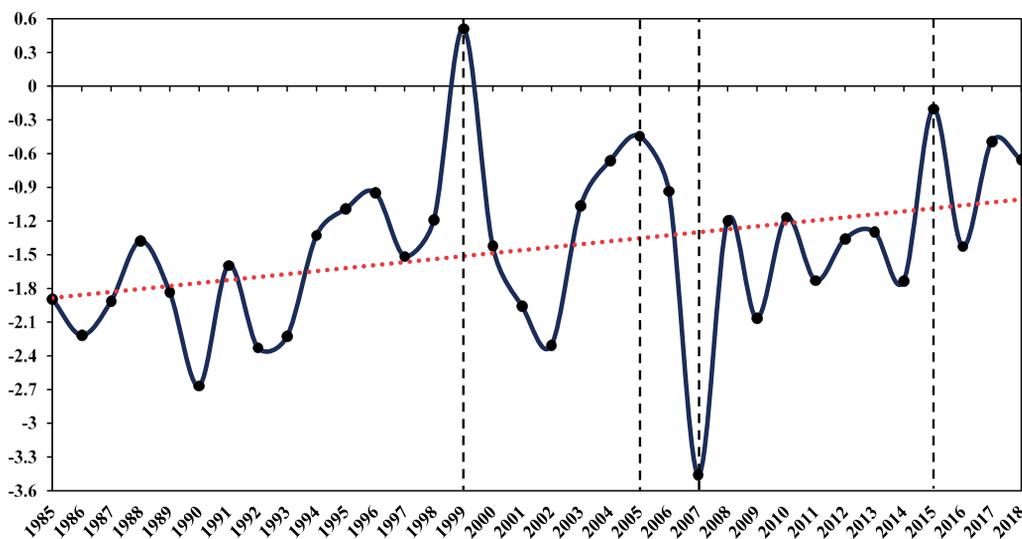


Figura 8. Tendencia de la diferencia entre la TSSN y la TSSM, desde 1985 hasta 2018.

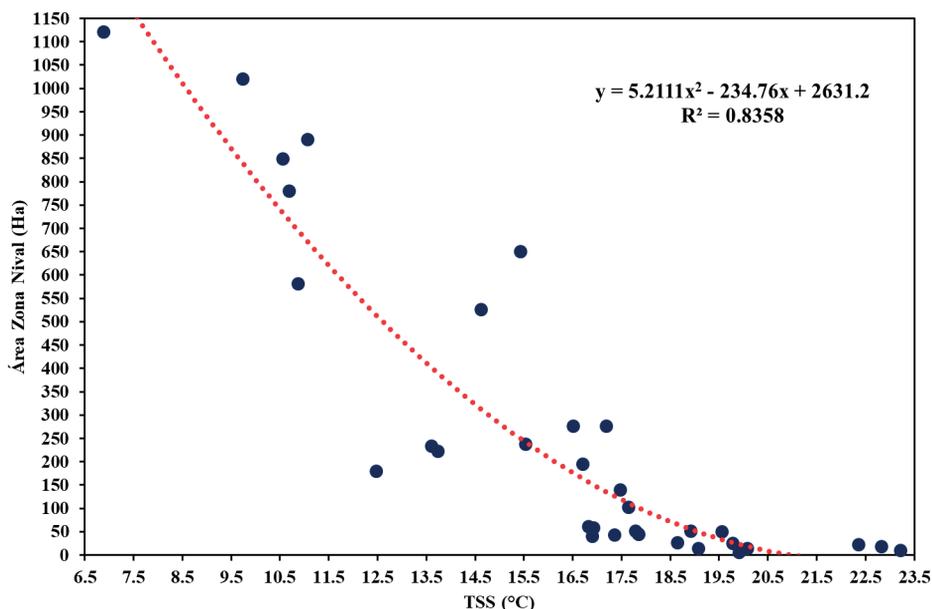


Figura 9. Correlación entre el Área de cobertura de nieve con respecto a la TSSN, desde 1985 hasta 2018.

sugiere plantear la hipótesis nula H_0 , esto es, no hay diferencia significativa entre la TSSM y la TSSN; la hipótesis alternativa H_1 indica que si hay diferencia significativa entre la TSSM y la TSSN. La aplicación de ANOVA a los dos grupos de valores da un p -valor=0,11, el cual es mayor al nivel de significancia $\alpha=0,05$, por lo que se acepta la hipótesis nula, lo que significa que no hay diferencia significativa entre los valores de TSSM y la TSSN. Del mismo modo, la aplicación de la prueba Mann-Whitney-Wilcoxon da un p -valor=0,27, el cual también es mayor que el nivel de significancia, confirmando que no hay diferencia significativa entre ambos grupos de temperaturas, de esta manera la TSSN y la TSSM siguen el mismo comportamiento.

La cobertura de nieve de la zona nival por encima de los 4800 m s.n.m. (CN) se calcula a partir del NDSI en las imágenes Landsat del mismo periodo en estudio. La correlación entre la CN y la TSSN se muestra en la Figura 9, se observa que la respuesta nival de la CN obedece al comportamiento de la TSSN según el modelo de la Ecuación 9.

$$CN=5,2111(TSSN)^2-234,76(TSSN)+2631,2 \quad (9)$$

Significa que la TSSN explica en un 83,6% el comportamiento de la CN, la misma que experimenta un fuerte decaimiento conforme aumenta la TSSN.

4. Conclusiones

La construcción de los mapas de distribución espacial del comportamiento anual de la TSS en la microcuenca Apacheta permite identificar y diferenciar las zonas frías de las calientes, además de su variación en el tiempo. La cuantificación de las anomalías positivas y negativas de la TSSM muestran el mismo comportamiento que la TSSN, demostrando que entre el 2010 y el 2018 existe un fuerte incremento de ambas. De igual manera, la tendencia en la serie de tiempo de la TSSM desde 1985 al 2018 demuestra que hay un incremento notable de 4,9°C equivalente al 27,5% de la TSSM, siendo menor que el incremento de la TSSN de 5,8°C equivalente al 35,3% de la TSSM. Este resultado indica que la permanencia de nieve en la zona nival está siendo afectada por los significativos incrementos de temperatura en el suelo.

Las series temporales de la TSSM y de la TSSN mantienen el mismo comportamiento, para lo cual las pruebas no paramétricas ANOVA y Mann-Whitney-Wilcoxon demuestran que ambos grupos de valores no tienen diferencias significativas. Asimismo, la variación de diferencia (ΔT) entre la TSSN y la TSSM muestra que ambas siguen la misma tendencia positiva y que la TSSN está incrementando en los últimos años más que la TSSM.

El comportamiento de la TSSN influye de manera directa en la CN, según el modelo representado en la Ecuación 9, donde la TSSN explica en un 83,6% la variación de la CN, que a su vez experimenta un fuerte decaimiento a consecuencia del progresivo incremento de la TSSN en la microcuenca Apacheta desde 1985 a 2018.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo financiero de los proyectos “*Strengthening resilience of Andean river basin headwaters facing global change*” (PGA_084063) y “*Agua-Andes: Ecological infrastructure strategies for enhancing water sustainability in the semi-arid Andes*” financiados por el Programa PEER de USAID, y el proyecto “*International Water Security Network*”, financiado por el Lloyd’s Register Foundation. Los autores agradecen a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga por su incondicional apoyo.

Referencias

- Aguilar, H., Mora, R., Vargas, C. 2014. Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo Flaash del software Envi. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39-59. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Aguilar, J., Espinoza, R., Espinoza, J.C., Rojas, J., Willems, B.L., Leyva, W.M. 2019. Elevation-dependent warming of land surface temperatures in the Andes assessed using MODIS LST time series (2000–2017). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 77, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.12.013>
- Araghi, A., Mousavi-Baygi, M., Adamowski, J. 2017. Detecting soil temperature trends in Northeast Iran from 1993 to 2016. *Soil and Tillage Research*, 174, 177-192. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.010>

- Artis, D. A., Carnahan, W.H. 1982. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12(4), 313-329. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(82)90043-8)
- Arvidson, T., Barsi, J., Jhabvala, M., Reuter, D. 2013. Landsat and Thermal Infrared Imaging. En C. Kuenzer & S. Dech (Eds.), *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications* (pp. 177-196). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6639-6_9
- Avdan, U., Jovanovska, G. 2016. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using Landsat 8 Satellite Data. *Journal of Sensors*, 2016, 1480307-1480307. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Carlson, T.N., Ripley, D.A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241-252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Caselles, E., Abad, F.J., Valor, E., Caselles, V. 2011. Automatic Generation of Land Surface Emissivity Maps. *Climate Change - Research and Technology for Adaptation and Mitigation*, 15. <https://doi.org/10.5772/24968>
- Chi, Y., Sun, J., Sun, Y., Liu, S., Fu, Z. 2020. Multi-temporal characterization of land surface temperature and its relationships with normalized difference vegetation index and soil moisture content in the Yellow River Delta, China. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01092. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01092>
- Dozier, J. 1989. Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9-22. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6)
- Gutman, G., Ignatov, A. 1998. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 19(8), 1533-1543. <https://doi.org/10.1080/014311698215333>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1), 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- ITT Visual Information Solutions. 2009. ENVI Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide, Version 4.7, pp. 44. http://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash_Module.pdf
- Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Skoković, D., Mattar, C., Cristóbal, J. 2014. Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840-1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>
- Mendoza, J.N. 2014. Implementación de un método operativo para la estimación de la temperatura superficial terrestre en la Región Callao usando datos de las imágenes satelitales. Universidad Nacional del Callao, 53. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/966>
- Moncada, W., Pereda, A., Aldana, C., Masias, M., Jiménez, J. 2015. Cuantificación hidrográfica de la cuenca del río Cachi-Ayacucho, mediante imágenes satelitales. Instituto de Investigación Científica e innovación Tecnológica de la UNSCH, II.
- Moncada, W., Willems, B., Rojas, J. 2020. Estimación de estadíos estacionales a partir de parámetros climáticos medidos en la estación meteorológica de la microcuenca Apacheta, Región Ayacucho, 2000 al 2018. *Revista de Investigación de Física. UNMSM*, 23(2), 17-25. https://fisica.unmsm.edu.pe/rif/previo_files/2020-2/03moncada.pdf
- Pereda, A., Moncada, W., Verde, L. 2018. Respuesta nival de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta de Ayacucho: Vol. I. Editorial Académica Española. <https://www.morebooks.shop/store/es/book/respuesta-nival-de-la-cabecera-de-cuenca-cachi-apacheta-de-ayacucho/isbn/978-620-2-12620-5>
- Quispe, B.J., Révolo, R.H. 2020. Temperatura superficial y estado de la vegetación del bosque de Polylepis spp, distrito de San Marcos de Rocchac, Huancavelica – Perú. *Enfoque UTE*, 11(3), 69-86. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n3.592>
- Rudjord, Due, 2012. Evaluation of FLAASH atmospheric correction (SAMBA/10/12; p. 24). Norwegian Computing Center. http://publications.nr.no/1338298623/Rudjord-Trier_FLAASH_2012.pdf
- Santos, B. 2016. Cubierta Nival y Temperaturas de Superficie en Sierra Nevada a través del tratamiento digital de imágenes de satélite [Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona]. <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/108441>
- Sayão, V.M., Demattê, J.A.M., Bedin, L.G., Nanni, M.R., Rizzo, R. 2018. Satellite land surface temperature and reflectance related with soil attributes. *Geoderma*, 325, 125-140. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.026>

- Sobrino, J., Jiménez, J., Paolini, L. 2004. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434-440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Solman, S.A., Nuñez, M.N., Cabré, M.F. 2008. Regional climate change experiments over southern South America. I: Present climate. *Climate Dynamics*, 30(5), 533-552. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0304-3>
- USGS, Landsat Collections, *Landsat Missions*. Consultado el 14 de octubre de 2019, de <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>.
- Vuille, M., Bradley, R.S. 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters*, 27(23), 3885-3888. <https://doi.org/10.1029/2000GL011871>
- Weng, Q., Lu, D., Schubring, J. 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467-483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Xu, C., Qu, J.J., Hao, X., Zhu, Z., Gutenberg, L. 2020. Surface soil temperature seasonal variation estimation in a forested area using combined satellite observations and in-situ measurements. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102156. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102156>
- Zhang, A., Liu, X., Di, W. 2009. Derivation of the green vegetation fraction from TM data of three gorges area. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 1152-1157. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.177>